

# 冰蓄冷系统的碳减排分析

樊 璞<sup>1</sup>, 龙惟定<sup>2</sup>

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 同济大学 中德工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 研究了冰蓄冷系统对电网和电力部门的贡献, 即冰蓄冷系统的正外部性; 提出了由于采用冰蓄冷系统, 给电力部门带来的碳减排量的方法论; 并对浙江省某办公建筑的典型冰蓄冷系统进行了分析. 结果表明, 冰蓄冷系统的应用可提高电网负荷率, 使电力部门实现减排; 此办公建筑的典型冰蓄冷系统的单位蓄冷量的碳减排量为  $0.686 \text{ kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$ ; 2006年空调期, 华东电网的电网负荷率每变化1%, 供电煤耗变化量为  $4.982 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ . 另外, 碳减排量可用作评价冰蓄冷系统对电网的贡献, 即冰蓄冷系统正外部性的一个指标.

**关键词:** 冰蓄冷; 碳减排; 电网; 评价

**中图分类号:** TU 831.3

**文献标识码:** A

## Carbon Dioxide Emissions Reduction Analysis of Ice Storage System

FAN Ying<sup>1</sup>, LONG Weiding<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Sino-German School of Applied Science, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The contribution of ice storage system to the power grid and electricity sector, that was, the positive externalities of ice storage system was studied. A methodology was presented to calculate the carbon dioxide emissions reduction caused by the utilization of ice storage system. Further, the typical ice storage system in an office building in Zhejiang province was analyzed. The results show that the utilization of ice storage system can improve the power grid load factor so as to enable the electricity sector cut emissions. And, carbon dioxide emissions reduction per unit of storage capacity for the typical ice storage system is  $0.686 \text{ kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$ . In the cooling periods of 2006, every time the load factor of East China power grid varied 1%, the variation of coal consumption of power supply was  $4.982 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ . In addition, it's proposed that carbon dioxide emission reductions

can be used as an indicator to assess the contribution of ice storage systems to power grid.

**Key words:** ice storage system; carbon dioxide emissions reduction; power grid; assessment

空调使用量的不断增加使夏季峰值电力紧缺、大峰谷差等现象更加突出. 冰蓄冷空调系统可以缓解这些问题. 在我国, 截至2006年年底, 已建与在建的冰蓄冷项目共计510项, 分布在4个自治区和18个省, 其中, 浙江、北京、江苏、广东、山东以及上海位于前6列<sup>[1]</sup>.

冰蓄冷技术在用电低谷期蓄存冷量, 用电高峰期融冰释冷单独供冷或与制冷机共同运行供冷. 由于电力负荷与空调负荷特性基本一致, 所以, 冰蓄冷技术具有削峰填谷的作用, 可缩小电网峰谷差、平衡电力负荷、减小机组装机容量、改善发电机组效率以及降低环境污染等<sup>[2]</sup>.

到目前为止, 对冰蓄冷系统的二氧化碳排放研究只是从系统本身考虑<sup>[3-4]</sup>, 对冰蓄冷系统的评价也只是从经济、环境和能耗三方面进行, 还未有文献把冰蓄冷系统对外部的影响作为评价指标来评价冰蓄冷系统<sup>[5-7]</sup>. 本文尝试研究冰蓄冷系统的正外部性, 即冰蓄冷系统对电力部门在碳排放方面的影响程度.

## 1 方法论

### 1.1 削峰量和填谷量

冰蓄冷系统运行策略包括全部蓄冷策略和部分蓄冷策略. 全部蓄冷策略是在夜间用电低谷期制冷机蓄冷, 其蓄冷量要达到白天空调所需全部冷量; 在

收稿日期: 2009-09-14

第一作者: 樊 璞(1977—), 女, 讲师, 博士生, 主要研究方向为区域建筑能源规划评价. E-mail: mrsfanying@163.com

白天用电高峰期,制冷机不运行.部分蓄冷策略是在用电低谷期蓄存一部分冷量,在用电高峰期由制冷机与融冰释冷共同承担空调冷负荷<sup>[8]</sup>.

与常规空调系统相比,冰蓄冷系统在白天用电高峰期用电量降低,此降低量为削峰量.在夜间用电低谷期,冰蓄冷系统制冰蓄冷,用电量高于常规空调系统夜间用电量,高出的电量为填谷量.全部蓄存策略的削峰量、填谷量均高于部分蓄冷策略.填谷量和削峰量表达如下:

$$E_{\text{pls}} = E_{\text{cmp}} - E_{\text{isp}} \quad (1)$$

式中: $E_{\text{pls}}$ 为削峰量,kWh; $E_{\text{cmp}}$ 为常规空调系统高峰时段耗电量,kWh; $E_{\text{isp}}$ 为冰蓄冷系统高峰时段耗电量,kWh.

$$E_{\text{vf}} = E_{\text{isv}} - E_{\text{cnv}} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{vf}}$ 为填谷量,kWh; $E_{\text{isv}}$ 为冰蓄冷系统低谷时段耗电量,kWh; $E_{\text{cnv}}$ 为常规空调系统低谷时段耗电量,kWh.

## 1.2 电网负荷率

电网负荷率为电网某时间段内的平均电力负荷与该时间段内的最高电力负荷之比,是衡量电网用电均衡程度的指标.电网负荷率愈高,电网峰谷差越小,发电设备利用效率越高,煤耗越小,碳排放量越低,环境效益越好.

假定未用冰蓄冷系统时的高峰时段电网供电量为 $E_{\text{h}}$ (kWh),低谷时段电网供电量为 $E_{\text{l}}$ (kWh),空调期为 $n$ (d),则空调期内电网平均负荷为 $(E_{\text{h}} + E_{\text{l}})/24n$ (kW),空调期内最高电力负荷为 $Q_{\text{max}}$ (kW),则未用冰蓄冷系统时的电网负荷率为

$$\gamma_{\text{a}} = \frac{(E_{\text{h}} + E_{\text{l}})/24n}{Q_{\text{max}}} \times 100\% \quad (3)$$

采用冰蓄冷系统后,高峰时段削峰量为 $E_{\text{pls}}$ ,低谷时段填谷量为 $E_{\text{vf}}$ ,则电网平均负荷为 $(E_{\text{h}} - E_{\text{pls}} + E_{\text{l}} + E_{\text{vf}})/24n$ (kW).最高电力负荷为 $Q_{\text{max}} - (Q_{\text{cmax}} - Q_{\text{ismax}})$ (kW),则此时电网负荷率为

$$\gamma'_{\text{a}} = \frac{(E_{\text{h}} - E_{\text{pls}} + E_{\text{l}} + E_{\text{vf}})/24n}{Q_{\text{max}} - (Q_{\text{cmax}} - Q_{\text{ismax}})} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{cmax}}$ 为常规空调系统100%负荷时的最高电力负荷,kW; $Q_{\text{ismax}}$ 为冰蓄冷系统100%负荷时的最高电力负荷,kW.

## 1.3 空调期电网负荷率与供电煤耗的关系

电网负荷率提高,供电煤耗下降.空调期电网负荷率与供电煤耗的关系可表达如下<sup>[9]</sup>:

$$\eta_{\text{g}} = \frac{\gamma_{\text{a}} \max(\sum_{j=1}^m P_{\text{ej}})_i}{24n} \frac{3600}{\left(\bar{b} \sum_i \sum_{j=1}^m \frac{Q_{\text{ji}}}{1 + \xi}\right) 29270} \quad (5)$$

式中: $\eta_{\text{g}}$ 为发电效率,%; $\max(\sum_{j=1}^m P_{\text{ej}})_i$ 为空调期 $i$ 内的最高电力负荷,kW; $\sum_{j=1}^m P_{\text{ej}}$ 为电网中 $m$ 台机组某一时刻的发电输出功率,kW; $\bar{b}$ 为空调期电网的平均供电煤耗, $\text{kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$ ; $\xi$ 为该地区平均发电厂用电率,%; $Q_{\text{ji}}$ 为第 $j$ 台机组在空调期 $i$ 内的发电量,kWh.

基于式(5),根据所研究地区电网数据,可得到该地区空调期电网负荷率与供电煤耗之间的定量关系.

## 1.4 碳减排量

根据所研究地区电网负荷率与供电煤耗之间的定量关系,计算出采用冰蓄冷系统后,由于电网负荷率的提高而引起的供电煤耗的降低值.结合电网供电量,可得到由于采用冰蓄冷系统而引起的该电网煤耗降低量,从而利用标准煤的碳排放因子可计算出二氧化碳减排量,即得到冰蓄冷系统的正外部性.

## 2 案例分析

以浙江某办公建筑的典型冰蓄冷系统为例<sup>[10]</sup>.该办公建筑空调系统使用时间为8:00—18:00,采用部分蓄冷策略,尖峰负荷为1440 RT(1 RT = 3.52 kW),制冷机空调工况性能系数为5.33,制冰工况性能系数为3.92,白天供冷,夜间不供冷.空调期为5个月(5月—9月),共150 d.100%负荷时的运行策略见图1.冰蓄冷系统以设计日逐时冷负荷分布图为设备选型依据,而常规空调系统以设计日最大小时负荷为设备选型依据.冰蓄冷和常规空调系统设备型号见表1.

该办公建筑高峰时段为白天,低谷时段为夜间,不同负荷率时的常规空调白天耗电量与冰蓄冷系统白天耗电量的详细计算列表见文献[10],日削峰量见表2.由于夜间不供冷,所以填谷量即为冰蓄冷系统夜间蓄冰耗电量.总削峰量和总填谷量见表3.表3中的天数等于总天数乘以机组在不同负荷率下的时间权值.100%,75%,50%及25%负荷率下的机组的时间权值分别为2.3%,41.5%,46.1%及10.1%<sup>[11]</sup>.

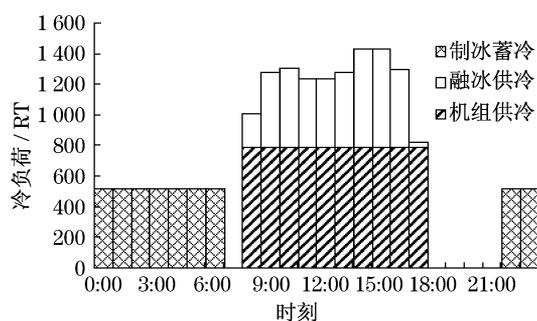


图1 100%负荷时的运行策略

Fig.1 Operating strategies under full load

表1 冰蓄冷和常规空调系统设备型号

Tab.1 Equipment model of ice storage system and conventional air conditioning system

系统类型	设备名称	规格型号	电功率/ kW	数量/ (台/套)
冰蓄冷系统	制冷主机	制冷量:394 RT	260	2
	板式换热器	制冷量:720 RT		2
	冷冻水泵	311 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ,32 m	45	2
	冷却水泵	400 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ,25 m	37	2
	乙二醇泵	280 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ,38 m	45	2
	冷却塔	400 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	15	2
	蓄冰装置	4 640 RTh		
常规系统	制冷主机	制冷量:480 RT	312	3
	冷冻水泵	290 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ,32 m	45	3
	冷却水泵	480 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ,25 m	45	3
	冷却塔	500 m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	22	3

表2 不同负荷率时的日削峰量

Tab.2 Daily load-shifting in peak hours under different load factors

负荷率/%	常规空调 白天耗电量	冰蓄冷系统 白天耗电量	日削峰量 kWh
100	10 631.0	7 740.0	2 891.0
75	8 325.0	5 004.0	3 321.0
50	5 987.0	2 283.4	3 703.6
25	3 073.0	900.0	2 173.0

浙江属于华东电网管辖范围,以华东电网 2006 年电力数据计算该地区电网负荷率与供电煤耗的定量关系.2006 年空调期内华东电网的最高负荷和月均负荷率见表 4.发电效率为 33%,发电厂用电率为 6%.

空调期内的最高电力负荷为  $10\ 654 \times 10^4$  kW,整个空调期的华东电网平均负荷为

$$\frac{1}{24n} \sum_i \sum_{j=1}^m Q_{ji} = \frac{1}{5} \times (7\ 599 \times 10^4 \text{ kW} \times 89.8\% + 9\ 302 \times 10^4 \text{ kW} \times 88.7\% + 10\ 030 \times 10^4 \text{ kW} \times 88.8\% + 10\ 654 \times 10^4 \text{ kW} \times 88.8\% + 9\ 789 \times 10^4 \text{ kW} \times 89.9\%) = 8\ 448.495\ 8 \times 10^4 \text{ kW}$$

将以上数据代入式(5),可得  $\bar{b} = 0.4982 \gamma_a$ ,即

表3 总削峰量和总填谷量

Tab.3 Total load-shifting in peak and non-peak hours

负荷率/%	日削峰量/kWh	日填谷量/kWh	天数/d	总削峰量/kWh	总填谷量/kWh
100	2 891.0	5 643	3.4	9 829.40	19 186.20
75	3 321.0	5 643	57.9	192 285.90	326 729.70
50	3 703.6	5 643	70.8	262 214.88	399 524.40
25	2 173.0	3 762	18.0	39 114.00	67 716.00
总计				503 444.18	813 156.30

表4 华东电网 2006 年 5—9 月份的最高负荷与月均负荷率<sup>[12]</sup>

Tab.4 Maximum load and monthly average load factor of east china power grid from May to September in 2006

时间	5月	6月	7月	8月	9月
最高负荷/10 <sup>4</sup> kW	7 599	9 302	10 030	10 654	9 789
月均负荷率/%	89.8	88.7	88.8	88.8	89.9

2006 年华东电网用电负荷率每变化 1%,供电煤耗变化量为  $4.982 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ .

常规空调 100% 负荷时的最高电力负荷为  $1\ 185.1 \text{ kW}$ ,冰蓄冷系统 100% 负荷时的最高电力负荷为  $774.0 \text{ kW}$ .根据式(4)得电网负荷率为:

$$\gamma_a = \frac{8\ 448.495\ 8 \times 10^4 \text{ kW} + \frac{813\ 156.30 \text{ kWh} - 503\ 444.18 \text{ kWh}}{24 \text{ h} \times 150}}{10\ 654 \times 10^4 \text{ kW} - (1\ 185.1 \text{ kW} - 774 \text{ kW})} \times 100\% = 79.299\ 2\%$$

未用冰蓄冷系统时的电网负荷率为  $8\,448.495\,8 \times 10^4 \text{ kW} / (10\,654 \times 10^4 \text{ kW}) = 79.298\,8\%$ . 采用冰蓄冷系统后电网负荷率增加了  $0.000\,4\%$ , 则供电煤耗可节省  $0.000\,4 \times 4.982 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1} = 1.992\,8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ . 2006 年空调期华东电网总供电量为  $3\,041.45$  亿 kWh, 则供电煤耗为

$$1.992\,8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1} \times 3\,041.45 \times 10^8 \text{ kWh} \times 10^{-6} = 606.10 \text{ tce}$$

按每吨标准煤中的含碳量为  $0.726 \text{ t}$  计算, 每吨标准煤的二氧化碳排放量为  $2.662 \text{ t}$ ,  $606.10 \text{ tce}$  的二氧化碳排放量为  $1\,613.44 \text{ t}$ , 即该办公建筑的冰蓄冷系统对华东电网的贡献为实现减排  $1\,613.44 \text{ t CO}_2$ .

该办公建筑的冰蓄冷系统不同负荷率下的蓄冷量及总蓄冷量见表 5.

表 5 蓄冷量  
Tab.5 Ice storage capacity

负荷率/%	蓄冷量/RTh	天数/d	总蓄冷量/RTh
100	4 638.6	3.4	15 771.24
75	4 638.6	57.9	268 574.94
50	4 638.6	70.8	328 412.88
25	3 092.4	18.0	55 663.20
总计			668 422.26

空调期的总蓄冷量为  $2\,352\,846.355 \text{ kWh}$ , 则该办公建筑的冰蓄冷系统的单位蓄冷量的碳减排量为  $1\,613.44 \text{ t} / 2\,352\,846.355 \text{ kWh} = 0.686 \text{ kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$ .

### 3 讨论

采用冰蓄冷系统后, 电网负荷率提高, 电力部门的碳排放量降低. 从案例分析可见, 碳减排量是可观的. 对于相同时间段的相同电网, 电网负荷率是个定值; 采用冰蓄冷系统后, 电网负荷率取决于削峰量、填谷量、常规空调系统  $100\%$  负荷时的最高电力负荷及冰蓄冷系统  $100\%$  负荷时的最高电力负荷. 削峰量、填谷量、冰蓄冷系统  $100\%$  负荷时的最高电力负荷与冰蓄冷系统的运行策略、冷负荷分布、系统规模有关. 常规空调系统  $100\%$  负荷时的最高电力负荷只取决于设计日最大小时负荷. 由于削峰量总是小于填谷量, 且常规空调系统  $100\%$  负荷时的最高电力负荷大于冰蓄冷系统  $100\%$  负荷时的最高电力负荷, 所以使用冰蓄冷系统后, 提高了电网负荷率, 实现了电力部门的减排.

冰蓄冷系统给电力部门带来的碳减排量可作为评价冰蓄冷系统正外部性的一个指标. 该指标是个

绝对量. 比较不同冰蓄冷系统的正外部性时, 需遵循以下前提: 以相同时间段的相同电网作为基准; 常规空调系统所选制冷机为电动制冷机, 且与冰蓄冷系统使用的制冷机为同一节能等级.

### 4 结论

冰蓄冷系统作为一项移峰技术对电力部门在减排方面具有可观的贡献. 主要结论如下:

(1) 冰蓄冷系统对电力部门具有正外部性.

(2) 采用冰蓄冷系统, 可提高电网负荷率, 降低供电煤耗, 实现电力部门的减排. 2006 年空调期, 华东电网的电网负荷率每变化  $1\%$ , 供电煤耗变化量为  $4.982 \text{ g} \cdot \text{kWh}^{-1}$ .

(3) 碳减排量可作为评价冰蓄冷系统正外部性的一个指标, 衡量冰蓄冷系统对电网的贡献.

### 参考文献:

- [1] 张永铨. 我国蓄冷技术的现状及发展[C]//中国制冷学会 2007 学术年会论文集. 杭州: 中国制冷学会, 2007: 785-789.  
ZHANG Yongquan. The existing condition and development of the cool storage technique in China [C]//Proceeding of 2007 Annual Meeting. Hangzhou: Chinese Association of Refrigeration, 2007: 785-789.
- [2] 方贵银. 蓄冷空调工程实用新技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000.  
FANG Guiyin. Practical technique on thermal storage air conditioning projects [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2000.
- [3] Beggs C B. Ice thermal storage: impact on United Kingdom carbon dioxide emissions [J]. Building Serv Eng Res Technol, 1994, 15(1): 11.
- [4] Beggs C B, Howarth A T. Ice thermal storage: theoretical study of environmental benefits [J]. Building Serv Eng Res Technol, 1997, 18(2): 157.
- [5] Dincer I, Rosen M A. Energetic, environmental and economic aspects of thermal energy systems for cooling capacity [J]. Applied Thermal Engineering, 2001, 21: 1105.
- [6] MacPhee D, Dincer I. Performance assessment of some ice TES systems [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(12): 2288.
- [7] 杨培莹, 章学来, 吕磊磊, 等. 某学术交流中心冰蓄冷空调工程经济性分析[J]. 建筑热能通风空调, 2008, 27(2): 36.  
YANG Peiying, ZHANG Xuelai, LV Leilei, et al. Economic analysis of ice storage air-conditioning system of an academic exchange center [J]. Building Energy & Environment, 2008, 27(2): 36.
- [8] Habeebullah B A. Economic feasibility of thermal energy storage systems [J]. Energy and Buildings, 2007, 39: 355.

(下转第 134 页)